

埼玉学園大学・川口短期大学 機関リポジトリ

テキストマイニングに基づく脳神経外科手術ロボット研究の動向分析

著者	菰田 文男, 正宗 賢, 那須川 哲哉, 大津 良司, 村垣 善浩
雑誌名	埼玉学園大学紀要. 経済経営学部篇
巻	17
ページ	41-52
発行年	2017-12-01
URL	http://id.nii.ac.jp/1354/00001069/



テキストマイニングに基づく 脳神経外科手術ロボット研究の動向分析

Trend Analysis in Research of Neurosurgical Robot Based on Text Mining

菰 田 文 男・正 宗 賢・那須川 哲 哉

KOMODA, Fumio MASAMUNE, Ken NASUKAWA, Tetsuya

大 津 良 司・村 垣 善 浩

OTSU, Ryoji MURAGAKI, Yoshihiro

今日、手術ロボットの役割はますます増している。しかしその普及は期待されるほどには進んでいない。今後、それが普及するためには世界のその開発動向の理解、その開発を妨げている要因を理解することが重要である。したがって本稿では、研究論文のマイニングに基づいて、世界の手術ロボットの研究・開発動向を解明する。

1. はじめに

医療、とりわけ外科手術にロボットを導入することに対する期待が高まっている。しかしその普及が順調に進んでいるとは言い難い。この開発と普及を促すためには世界の研究動向を知り、その問題点や重点的育成分野などを発見する必要がある。そのために本稿では世界の脳神経外科分野の学術論文をマイニングすることによって、その研究動向を解明する。

手術ロボットが必要になるのは、以下のような背景がある。

- (1) アメリカFDAにより承認される新規医薬品数が頭打ちになっていること、遺伝子工学の臨床への応用実績が進まないことなどに象徴されるように、医療技術向上のため

のブレークスルーが得られない中で、手術ロボットが医療技術の向上に貢献できると期待できる。

- (2) 多くのロボット技術の中で培われてきた要素技術が、医療というロボット化が容易でなかった分野でも利用できるという可能性が生まれている。
- (3) 大部分の先進国で問題となっている国家財政に占める医療費の増加に対して、自動化がその削減を可能とするかもしれないという期待がある [25]。

そうであるにもかかわらず、手術ロボットの開発の成果は十分にはほど遠いのが現状である。広く受け入れられている手術ロボットはda Vinciなど少数にとどまっているに過ぎない。したがって、医療・手術ロボットの開発を促すためには、まず世界の研究開発の動

向を可能な限り正しく把握し、それがどのような問題点を抱えているのか、どのような成果が得られそうであるかなどを知る必要がある。そのための一つの方法は世界の研究論文をマイニングすることによって、研究動向の全体を鳥瞰することである。本稿では、手術ロボット、とりわけ脳神経外科分野の手術ロボットに焦点を当て、海外の定評のある学術論文誌のテキストマイニングによって、この鳥瞰、および手術ロボットの実用化に向けてどのような技術が不足しているのか、どのような分野を重点的に育成すべきか等の指針を得ることを目的とする。

2. 定義と現状

2.1 定義

まず、手術ロボットの定義をしておくことが必要である。なぜなら、産業用ロボットや各種サービスロボットと同様に、手術ロボットも厳密に定義すれば「ロボット」と言えるものは少ないからである。

手術ロボットであれ、その他各種ロボットであれ、それがロボットの名に値するための基本的な要件は「自律性」であろう〔5〕。例えば人が操作しなくても、体内の障害物を自らの判断で認識し回避できる機能である。ただ、このように手術ロボットを厳密に定義すると、手術ロボットはda Vinciも含めて現時点でほとんど存在しないということになってしまう。

手術ロボットは内視鏡のコンピュータ制御されるようになり、マスタースレーブ式に進化してゆくなかで、将来的に少しずつ自律性を獲得してゆくという形で進化するであろうと思われるが、本稿ではこのような自律性を獲得するための技術的ベースとなり、プリミ

ティブなレベルではあっても自律性らしきもの（あるいは将来の自律性獲得の先駆けになるもの）を有しているツール（内視鏡の一部、コンピュータ制御システムの一部など）は手術ロボットとして広義に捉えることとする。したがって、テキストの解釈において「robot」という語で表現されれば、少なくともそれは将来の自律性に向かう技術ベースを含んでいるとし、また「endoscope」「computer」などの語を含めば、そのうちの一定程度の技術はそのベースを含んでいると解釈して本稿の分析を進める。

2.2 現状

手術ロボットの開発に対する期待が上述のように高まり、他の分野でのロボットの要素技術が進歩しつつあるにもかかわらず、手術ロボット研究の成果は大きくない。アメリカFDAによって2000年に認可されたda Vinciは、世界で最も広く受け入れられ成功した数少ない例である。また、1987年にインテグレートッド・サージカル・システムズ社が発売開始した定位脳手術を支援するNeuroMateは、後述のように進化し現在でも多くの病院で利用されている。しかし、このように多いとは言えない手術ロボットでさえ、自律性を持つ真の意味でのロボットという水準にまでは達していない。手術分野とは異なるがパワースーツがリハビリ等での利用が期待されているが、その普及は今後に残されている。

脳神経外科手術ロボットの開発と普及が思うようには進んでいない現状を知るために、Neurosurgery Focus誌に収録された論文数を見る。同誌に論文のうち、「robot」または「computer」または「endoscope」という語、あるいはこの類似語を含んでいる論文は2000

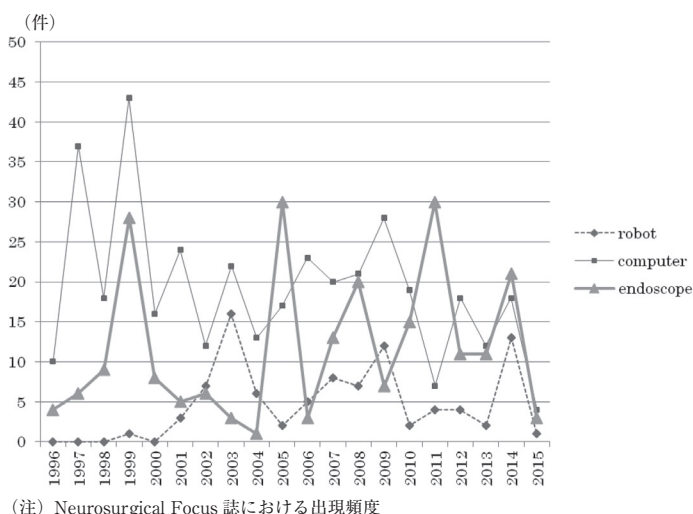


図1 手術ロボット関連の論文件数の推移

年頃から現在まだ30～50件であり（図1）、これは同誌に収録される全論文の7～9％程度である。また「robot」という語のみを含む論文に限定すれば、その比率は1990年代にはほとんどゼロである。2000年代に入って例外的に7％にまで達することがあったが、2000年以後もほとんどの年は1％から3％程度である。

このように2000年頃から、脳神経外科手術向けのロボット研究が、少しずつではあるが増えるようである。このことは、2000年代に始まるda Vinciの導入など、実際の手術ロボットの開発や実用化の動きと符合していると思われる。しかし目ざましく伸びているとは言えず、むしろ2010年代には件数としては減少傾向を示している。論文数は実際の研究動向を反映しているだけでなく、雑誌の特集のような編集部の意向なども反映している場合もあると思われるが、しかしこのような特集の設定は現実の研究と無関係ではないことも事実であるので、論文数によって研究の動向を類推することは可能である。

手術ロボットが十分に成果を得られていない理由としては、以下がある。

- (1) 産業用ロボットであれば形状や材質が画一化された加工対象を画一化された動作の反復をおこなうにすぎず、またその動作が100％の信頼性を求められることもない。これに対して手術ロボットの場合、操作対象は個性があり画一化が難しい人体であり、またミスを許さない高い信頼性を求められるので、産業用ロボットを遙かに上回るコンピュータ制御技術が必要となる。
- (2) 技術開発には、要素技術に熟知した開発主体とニーズを熟知したユーザーとの連携が必要であり、技術シーズとニーズとがマッチングすることが必要であるが、手術という高度で専門的で個性的な医師の手技と切り離せないニーズを、ロボット技術開発主体としての工学研究者が知ることが難しく、両者のコミュニケーションが取りにくい[9]。
- (3) 国家の資金援助が増えてきつつあるとはいえ、リスクを抱え多額の資金を必要とする

るロボット開発に対する支援としては十分ではない。

この限界を克服するためには、世界の手術ロボット研究の動向を鳥瞰し、基本的なトレンドを理解するとともに、新たな可能性のある技術・機能・利用用途に関する予兆を発見することが必要なのである。

3. 方法

3.1 対象とする論文誌

分析の前に、本稿で対象とするテキストデータの性質について説明しておく必要がある。

一般に研究開発の動向を鳥瞰する際に利用されるテキストデータは、特許、学術研究論文などであるが、本稿では学術研究論文を用いる。その理由は手術ロボットの開発は特許申請段階や実用化にまで至らない研究が多く、また特許公報に記述されている叙述では研究が目指している大きな方向性やニーズあるいは機能が分かりにくいからである。また、本稿では日本の学術論文ではなく、海外の著名な学術論文誌に掲載された論文を選択した。その理由は国内の論文誌については著者の一人（大津）が『日本ロボット学会誌』を用いた分析を既に行っているからである。また国際的に著名な論文誌に投稿されている論文は重要な研究だからであり、また日本だけにバイアスがかからない動向の鳥瞰を行うことができるからである。

本稿で分析対象とする雑誌は脳神経外科分野全般を包含するNeurosurgery Focus誌（以下NF誌）の1996-2015年3月までに掲載された論文2,762件である。

ところで本稿ではテキストマイニングという解析手法を適用するのであるが、それには

次のようなテクニカルなレベルでの限界、あるいは不十分さがあることを理解しておく必要がある。まず、pdfファイルやHTMLファイルをテキストデータに変換してマイニングしたのであるが、この変換作業のプロセスで文字化けや改行コードの処理のミスなどが避けられず、そのために原文と完全に一致したデータを得ることは困難であった。さらにNF誌の全記事の中から、研究に関係する論文のみを抽出する判断も筆者ら自身が行っており、その際に恣意性が混入することも避けられなかった。

このような制約があるとはいえ、テキストマイニングにおいては若干のテキストデータの不十分さは、分析に大きな影響は大きくないと考えて差し支えないであろう。

3.2 検証手法

3.2.1 高出現頻度語の時系列分析

テキストマイニングに用いられる形態素解析ツールから得られる基本的データは、(1) 個々の語の出現頻度、(2) 語と語の共起関係の出現頻度の二つである。この出現頻度の高い語や共起関係に着目することによって、全体の基本的な動向を知ることができる。たとえば出現頻度の高い語から技術進歩の基本的流れ、あるいは大局的な流れを発見することができる。出現頻度が高い語は重要性が高く、手術ロボット全体の進歩のベースとなる技術だからである。とりわけ高出現頻度語の時系列データを見ることにより、その過去の変化を知り、将来の予想をおこなうこともできる。したがって、本稿でも時系列の変化から手術ロボット研究のメインストリームを知り、どのような技術が重視されてきたか、あるいは逆にどのような技術が不足しているか等を発

見する。

しかしその反面で、テキストマイニングにおいて、出現頻度の高い語のみに注目していると重要な意味を見失ってしまう。なぜならテキストマイニングにおいては出現頻度の高い単語よりも、低い語の方が重要である場合が多いからである。とりわけ重要なのは未来の予兆の発見であるが、このような予兆を体现している語は広く認知されていないので、出現頻度は自ずと少なくなるのである。そもそも出現頻度の高い単語はテキストマイニングを用いなくても既に知っている場合が多いので、テキストマイニングをおこなわなくても知識は得られる場合が多い。したがって、出現頻度は低いが重要性が高まりつつある語を発見するほうが、その意義が大きい場合も多いのである。

とりわけ、解析対象とするテキストデータ量が多くない場合や、技術文書のように語の多様性が多くなりがちなテキストである場合には、個々の語の出現頻度が極めて少なくなってしまう、そのためにマイニングの結果が偶然に左右されることが多くなり、現実を正しく反映しているかどうかは分からないと

いうケースも生じる。

したがって、上述のようにテキストマイニングにおいては、単にマイニング結果をそのまま受け入れるのではなく、知識を有する解釈者がマイニング結果を参照し、その結果の正しさを受け入れて自分の認識を修正するという作業と、逆に自分の知識に基づいてマイニング結果は現実を反映していないと解釈する作業をおこなうこととを同時におこなうことによって、正しい認識に到達することが大切なのである。たとえば共起関係を出現頻度の絶対数のみで見ても不十分であり、相関値で見てゆくことが必要になる。したがって、以下でも相関値も含めて共起関係を見る。¹⁾そしてこの正しい認識のためには解析する人間の専門的な知識を動員することが必要になる。

3.2.2 脳神経外科手術ロボット技術の見取り図作成

テキストマイニングにおいては人間の知識を動員することが欠かせないが、それは辞書作りでもある。テキストマイニングの一連の手順は辞書作りに始まり、この辞書がどれだ

表 1 脳神経外科手術ロボット技術の見取り図

(1) システム／装置
内視鏡、マスタースレーブ手術ロボット、インテリジェント手術ロボット、インテリジェント手術室
(2) 部品・要素技術
アーム、マニピュレータ（多関節）、ナビゲーション技術、画像処理（三次元画像認識）、センサ（画像センサ、触覚センサ、速度センサ）、インテリジェント制御（フィードバック、フィードフォワード制御、意思決定支援）
(3) 求められる機能
低侵襲性、自律性、正確さ、小型化、自動化、アームの複雑・柔軟な動き、自由度の向上、可動域拡大、回転、多関節、スピード制御）、人の指にはできない動き、臓器のしっかりした把持、画像処理（隠れた部位を含む広範囲な画像認識、鮮明な画像認識、リアルタイム画像認識）、滅菌、メンテナンスの容易化、低コスト、コストパフォーマンス向上
（出所）[31]、p.186を大幅に加筆修正

け適切であるかによって、テキストマイニングの成果は大きく分かれると言っても過言ではない [26]。とりわけ本稿が対象としている出現頻度の少ない重要語を重視するマイニングにおいては、それを発見するための指針あるいは見取り図として専門家の知識が重要になる。

この見取り図を描くためには脳神経外科手術ロボットについての概観をしておくことが必要である。これを(1)トータルシステム、(2)部品・要素技術、(3)機能という視点から見てみる。

まずトータルなシステムとしては、手術ロボットはその前駆的な装置としての手術用内視鏡に始まり、それがマスタースレーブ型のロボットに進化し、将来的にはより知能が高いインテリジェントロボットに進化すると期待される。また要素技術としてはナビゲーション技術、画像処理技術、センサなどが必要である。

求められる機能としては、第1になによりも低侵襲化が要求され、これに貢献できる技術や機能が求められる。とりわけ脳神経外科手術ロボットには低侵襲のための手法が求められる。脳神経外科の手術において求められるのは、深い部位にまで正常な組織を傷つけることなく術具をいれることが必要である。脳は他の部位以上に細かな神経が多数あり、その損傷が予後の生活の質に大きく影響するからである。

第2にそのためには、システムや部品の小型化や精密で微細で正確な剥離や切除や吻合のための技術が求められる。対象に到達するまでの空間が狭くなるからである。

正確さについて論じる際に忘れてはならない重要な点は、センサで測定したときの真値

に近い値の正確さを意味するaccuracy（正確度）と、同じ動作を正確に繰り返す際の精度のばらつきを意味するprecision（精度）は意味合いが異なるということである。手術において、特にマスタースレーブの動作の繰り返し精度が高いことは前提であり、その上でより高い正確性の向上が本質的に求められているのである。この正確さのためには、画像認識技術やナビゲーション技術が必要である。また、多関節のアームを速度制御やフィードバック制御することによって、複雑な動作を柔軟に実行することが求められる。また可動域を増やすことも必要である。²⁾ そのためのアームの回転、多関節などが求められる。さらに内視鏡自体は柔らかく、しかし先端部分は十分な剛性のあるようなシステムを開発する必要がある [33]。

第3に低侵襲性のためには、一方で対象部位の臓器を損傷させることなく、しっかりと把持するための仕組みが求められる。したがって要素技術あるいは部品としては、アーム／マニピュレータ、それを動かすナビゲーション技術、それに必要な画像認識技術や圧力センサ等の各種センサが必要である。³⁾

第4に、正確な手術のために、術者の手ぶれを防止するシステムが必要である。そのために筆者等は、術者の腕を支える台を備えたシステムを導入した [10]。

それ以外にも、脳神経外科手術毎にメンテナンスを行う必要がある現状を克服して、容易化することや、滅菌の完全性なども求められる機能である。さらにコストを引き下げることも極めて重要な必要要件である。

このように予め手術ロボットの技術体系をまとめておくことが必要であるが、これを本稿では表1のように体系化した。

4. 結果と考察

4.1 疾患別出現頻度の推移

まず、脳神経外科が研究対象としている疾患が過去も20年近くの間にもどのように変化しているかを知るために、NF誌における主要な疾患名の推移（3つの期間（1996-2002年、2003-2008年、2009-2015年）を見ると、図2のようになる。

同図によると、「hemorrhage」「brain tumor」「thrombolysis」の件数が多い。またほとんどの全ての疾患の研究にかんして、1990年代～2000年代初頭に比べて、それ以後の論文数は増えている。しかし、2000年代末以後もさらに増えているのは、「hemorrhage」「intracerebral hemorrhage」「thrombolysis」「infarction」「brain injury」だけである。出血や梗塞のような血管障害と脳外傷の研究が増加しているのである。とくに、脳の出血や

梗塞に関する研究は伸び率だけでなく、絶対数も大きく、脳神経外科研究の大きな関心テーマであることが理解される。

4.2 機能と要素技術別の共起頻度の時系列分析

次に、このような疾患に対する治療法として求められる手法や機能や要素技術と、「endoscope」「robot」との共起関係の出現頻度の推移を、表2に示す。同表は「anastomosis」のようにロボットや内視鏡を用いた手術のみでなく、主として手術全般にかんする語と、「manipulator」のように主として内視鏡やロボットに限定される語とが混在している。

まず主に手術全般に関わる語からみてゆく。

非侵襲性、低侵襲性の治療は基本的かつ理想的な方向性である。しかし、「noninvasive method」は3つの期に13→20→24件と着実に増加しているとはいえ、全体から見れば未

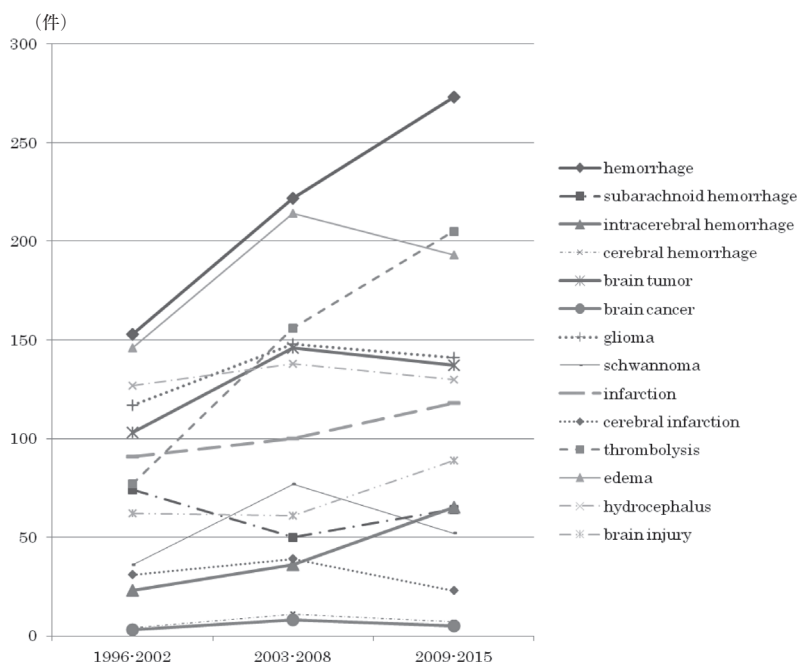


図2 脳神経外科の疾患別出現頻度の推移（NF誌）

表2 脳神経外科手術に関する語の出現頻度（NF誌）

年	全件			内視鏡			手術ロボット		
	1996 ～2002	2003 ～2008	2009 ～2015	1996 ～2002	2003 ～2008	2009 ～2015	1996 ～2002	2003 ～2008	2009 ～2015
合計	775	978	1009	69	72	98	8	30	32
noninvasive method	13	20	24	0	0	0	2	4	0
noninvasively	6	6	3	0	0	0	0	0	0
minimal invasiveness	4	4	5	0	0	0	0	0	0
neurovascular	19	53	60	9	12	24	0	2	4
flexible endoscope	6	6	8	9	6	8	0	0	0
master slave	0	1	0	0	0	0	0	0	0
intelligence	22	25	14	2	2	1	0	0	2
intelligent	3	3	4	1	0	1	1	3	0
microsurgery	27	51	62	7	12	16	0	4	3
miniaturization	1	2	4	1	0	2	0	1	1
navigation	35	51	92	6	12	24	1	2	8
neuronavigation	14	41	85	0	4	9	1	3	8
robot arm	3	13	10	0	0	3	13	10	
manipulation	120	123	143	18	17	32	3	9	4
joint	37	71	36	1	3	3	0	4	3
speed	24	32	44	3	0	3	0	3	6
velocity	57	55	53	3	1	5	0	0	4
flexibility	25	49	31	4	3	4	2	7	3
complexity	50	71	92	6	4	11	7	0	0
feedback	35	48	80	3	5	10	1	5	10
tactile feedback	1	9	6	1	2	2	0	1	1
feedforward	1	0	0	0	0	0	0	0	0
automation	0	0	2	0	0	0	0	2	1
adhesion	70	78	71	11	10	15	1	1	0
anastomosis	17	48	39	1	2	3	0	0	0
microanastomosis	0	3	3	0	0	0	0	0	0
fixation	147	168	152	13	15	24	4	15	9
precise location	4	16	12	3	1	3	0	0	0
precise localization	10	7	9	0	2	2	2	3	1
precise mechanism	5	13	6	0	0	0	0	0	0
removal	303	352	368	46	45	74	8	30	32

microsurgical removal	11	8	10	3	2	6	0	0	0
endoscopic removal	8	3	4	7	3	3	0	0	0
clipping	21	14	32	3	1	4	0	1	0
coil placement	4	20	1	0	0	0	0	0	0
accuracy	86	121	169	6	7	22	12	18	7
accurate localization	4	12	6	2	0	4	0	1	2
accurate placement	5	4	11	0	2	2	0	2	1
roll	17	18	9	5	3	1	0	0	0
high-speed drill	35	29	30	10	6	15	0	0	0
tactile	7	19	19	2	2	6	1	2	3
touch	8	17	17	2	0	1	0	0	1
grasp	11	9	7	6	3	3	0	1	1
grasper	3	0	4	3	0	2	0	0	2
grasping force	0	0	1	0	0	0	0	0	0
grip	3	1	3	0	0	1	0	0	0
grip strength	8	3	3	3	0	0	0	0	0
slippage	16	10	6	0	2	0	1	0	0
tremor	23	19	28	0	0	2	0	1	3
sensor	16	18	18	0	3	2	2	5	4
force sensor	0	0	2	0	0	0	0	0	2
image	300	397	462	40	47	70	7	20	22
video	42	46	61	18	14	14	0	3	5
3-D	9	0	0	2	0	0	1	0	0
three-dimensional	80	65	27	4	1	1	1	3	0
image guidance	20	40	54	0	6	12	1	5	3
decision making	24	48	89	0	0	5	1	1	4
force feedback	1	2	0	0	0	0	0	0	2
tactile feedback	1	9	6	1	2	2	0	0	0
visual feedback	0	0	7	0	0	3	0	0	0
haptic feedback	0	0	2	0	0	0	0	0	0
cost	92	93	191	10	6	19	1	5	12
low cost	2	4	17	1	0	5	0	0	0
cost effectiveness	11	6	13	4	0	0	0	0	3

だ大きいとは言い難い。「noninvasively」「minimal invasive」についてもそれぞれの期に数件程度にとどまっている。とくに、内視鏡に限ればゼロであり、手術ロボットについても通年で6件にとどまっています。ロボット技術開発が低侵襲性の方向を向かっていない現実を示唆しているようである。

剥離、固定、切開、吻合、クリッピングなどの基本的手技についてみると、「removal」が通年で1,023件で最も多く、「fixation」が467件、「anastomosis」が104件となっている。また剥離と関係している「adhesion」は219件である。また対象部位を触ったり掴んだりする手技と関係する語である「grasp」「tactile」「touch」は、それぞれ約30-50件程度であり、他と比して大きくはないが、重要な研究テーマであることが分かる。

これら基本的手技のうち、内視鏡やロボットと関係が深いのは「removal」である。絶

対件数が多いだけでなく、「removal」と「robot」との共起関係の出現頻度は1996-2002年から2003-2008年、2009-2015年にはともに4倍に増加している。脳神経外科のロボット研究のメインストリートが、切除機能を目指していることが分かる。これに対して、「anastomosis」はほとんど共起しておらず、このことは脳神経外科手術ロボット一般については、吻合に役立てられていないということの意味するのか、あるいは単なるデータの揺れによるものにすぎないのかについて検討される必要がある。たとえば、技術的に困難な脳最深部の微細血管の吻合を目指す手術ロボット「MM1」のような例もある [34]。

また、手術にとって対象部位を滑らないように掴み、しっかりと固定することは不可欠であるが、手術ロボットと「tactile」「touch」「grasp」との共起関係は強くないことが示すように、この作業にとって現状のロボットは

十分ではないということを示唆しているのかもしれない。

さらに、「clipping」は「coil placement」の件数を大きく上回っている。

次に手術においては、柔軟で迅速に複雑な作業を行う必要があるため、それと関係する語としての「flexibility」「speed」「velocity」「complexity」についてみると、絶対数では「complexity」が最も多く、また増加率も大きい。それに次いで絶対件数では「velocity」が多く、伸び率では「speed」が大きい。迅速性も重視されるようになっていくことが分かる。

これを内視鏡とロボットについてみると、内視鏡・ロボットとの共起関係が2009-2015年に増えているのが、「speed」「velocity」である。ロボット化が作業の迅速化に貢献できることを反映しているのかもしれない。ロボットについては「flexibility」との共起関係は多い。脳の定位手術に用いられるNeuroMateロボットは、6自由度の多関節アームによって自由度の高い柔軟な動作をおこなうことが可能になっているが[11]、このような動きが将来のロボット化に向けた技術的ベースになると期待される。

また「microanastomosis」と内視鏡、ロボットとの共起関係の出現頻度が、ともにゼロである。精密な吻合に機械の小型化が貢献できていない現状を物語っているのかもしれない。

次に手術にとって最も重要な正確さを示す語としての、「accuracy」や「precise location」等についてみる。顕著に目立つのは「accuracy」が通年の件数としても通年で376件と極めて大きく、しかも増加率も第1期から3期に2倍になっているように、ますます重視されつつあるということである。正確さ

は手術、とりわけ脳神経外科手術にとって最優先である。ただ「precise location」「precise localization」「precise mechanism」については、件数もさほど大きくはなく、また増加も示していない。前項で見たセンシング精度の研究に比して動作精度の研究は、少ないという現状を反映しているのかもしれない。本稿でマイニング対象とした論文の全ての著者がaccuracyとprecisionとの違いをどれだけ意識して用いているかという問題はあるとはいえ、accuracyに比してprecisionを含む語の出現回数が少ないことは、マスタースレーブ型手術ロボットの流布の現状を踏まえ、さらに将来の理想的な手術ロボットを目指して、多くの研究が積み重ねられつつある現状を物語るものと解釈できる。

さらにこれを内視鏡・ロボットについてみると、内視鏡は「accuracy」「accurate localization」「accurate placement」が少しずつ増加しているが、ロボットは「accuracy」との共起関係が逆に減少している。

もう一つの興味深い事実は、「cost」の著増であり、3期間に92→93→191件となっている。2010年代に重視されるようになっていく。同様に「low cost」2→4→17件へと増加している。手術ロボットに限定してみても、第3期に「cost」「cost effectiveness」が増加している。これは手術ロボットの導入が高コスト医療につながりがちであるとともに、その反面で先進国に共通する医療コスト削減要求とが矛盾していることを、反映していると推測される。手術ロボットの機能を高め、低侵襲性や正確性などを実現するためには、コスト上昇にはつながるという現実を示唆しているのかもしれない。⁴⁾

また筆者らは手術ロボットのインテリジェ

ンス化は単体としてのロボットとしてではなく、滅菌、機器の配置などを含めて手術室全体がシステムとしてインテリジェンス化する方向を目指すべきと考えているが〔8〕、このような兆候を示す語は未だ多くないようである。

さらに「speed」「velocity」「speed control」など、速度に関する語も少なくない。マニピュレータやアームのスピードを制御して把持、切除、剥離、吻合などを正確におこなうことが必要である事実を反映していると解釈できる。

次に、表2において内視鏡や手術ロボットにかかわる度合いが大きい技術についてみる。

まず手術ロボットはマスタースレーブ型からさらにインテリジェンスのあるシステムを指向しているが、「master slave」の出現件数はほとんどゼロである。「intelligence」は全論文数の中でみれば3期を通じて20件前後であるが、手術ロボットに限定すれば「intelligence」あるいは「intelligent」が2～3件出現する程度である。

しかし、インテリジェンスの具体的内容を体现している単語としてのフィードバックに注目すると、「feedback」は全論文数の中で第3期には80件となり、第1期の2倍以上に増加している。手術ロボットに限定しても1→5→10件とへと著増している。また、「decision making」も手術ロボットに限定すれば、第2期まではそれぞれ1件であったが、第3期には4件となっていることも、ロボットのインテリジェンス化という観点から、興味深い。ただし「feedforward」については全論文数の中でも通年で1件しか出現していない。フィードフォワードのような、より高度なインテリジェンスの獲得への道は、容易ではな

いようである。筆者らは、たとえばマニピュレーションのナビゲートなどの技術も、いきなり全自動化を目指すのではなく、術者の作業を順に自動化するというアプローチで知能を高めてゆくべきだと考えており〔20〕、マイニング結果でインテリジェンスに関する語が多く出現しないことに違和感はない。

興味深いのは、手術ロボットと関係している「tactile feedback」「force feedback」が2009-2015年にそれぞれ1件、2件出現していることである。筆者らは対象部位を巧みに触ったり掴んだりすることが大切であると考えており、このためにフィードバック制御システムが導入されることの有効性を示唆する数値と捉えられるのではないかと考える。

手術ロボットにとっての最も中核的な技術の一つはナビゲーションである。ナビゲーションと関係する語としての「navigation」「neuronavigation」「robot arm」「manipulation」は全論文としても、内視鏡や手術ロボットとしても1996年から2005年にかけて増加している。

5. 結論

手術ロボットは主として腹部手術などに利用され、脳神経外科での利用は今後の課題であるが、この利用が進むためには狭い空間を精密に作業できる技術開発が必要である。本稿では学術論文をマイニングによって脳神経外科手術ロボットの研究動向について論じた。その結果は以下の通りである。

第1に、手術ロボットの研究は内視鏡の研究と関連を有しつつ、2000年頃から少しずつ増えているが、本格的に増え始めているとは言い難い。

第2に、論文数の推移から推測される研究

の中心テーマは、画像、ナビゲーション、各種のセンサなどである。

ただ、今後の検討課題も残る。テキストマイニングにおける重要課題は出現頻度は少ないが、しかし現在少しずつ顕在化しつつある将来の予兆を発見することであり、そのためには解析結果からは目立たない低出現頻度語を発見することが必要である。そのためには単にコンピュータアルゴリズムのみに依存した解析により、語のネットワークを作り上げるのではなく、専門家の知識に導かれた語のネットワークを作ることが必要であろう。

注

- 1) ここでいう相関値とはA、Bを二つの文書集合、Dを全文書集合とすると、 $A \cap B / A \cup B$ として定義され、さらに件数の少ないために信頼性の低いデータについては低めに補正されている。
- 2) 自由度の高いマニピュレータの重要性については [16]。
- 3) 低侵襲化の推進のために触覚技術が重要であることについては [28] [15] [23]。
- 4) 従来の鉗子セットに比して、内視鏡を用いた鉗子セットのコスト10倍になり、手術ロボットにすると30倍になるという報告もある [7]。

参考文献

- [1] 日本総合研究所・日本ロボット学会・人工知能学会・日本人間工学会：ロボット分野におけるアカデミーロードマップ報告書, pp.1-35, 経済産業省, 2008.
- [2] 特許庁：特許出願技術動向調査報告書(ロボット), pp.1-341, 特許庁, 2014.
- [3] 特許庁：特許出願技術動向調査報告書(内視鏡), pp.1-561, 特許庁, 2015.
- [4] 阿部秀尚, 平野章二, 津本周作, “病状経過知識抽出のためのテキストマイニング”, *The 19th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence* : 2005, 2005
- [5] 鎮西清行：“医療機器国際規格の最近の動向”, *医療機器学*, vol.85, no.5, pp.530-534, 2015.
- [6] Goto T, Hongo K, Yako T, Hara Y, Okamoto J., Toyoda K., Fujie M., Iseki H., “The Concept and Feasibility of EXPERT: Intelligent Armrest Using Robotics Technology”, *Neurosurgery*, vol.72, A39-A42, 2013/01.
- [7] 稲本紀幸：“新しいメカニズムの多自由度鉗子 Radius Surgical Systemを用いた内視鏡外科手術”, *日本内視鏡外科学会誌*, vol.13, no.6, pp.723-728, 2008.
- [8] 伊関洋, 村垣善治, 中村亮一, 堀智勝, 高倉公朋, 杉浦田, 谷口拓樹, 小澤紀彦, 白川洋：“インテリジェント・オペ室・MRI誘導手術対応システム”, *MEDIX*, vol.39, pp.11-17, 2003.
- [9] 伊関洋, 村垣善治, 丸山隆志, 鈴木孝司, 生田聡子, 秋元治朗：“医療機器開発と医療機器の医師主導治療”, *日レ医誌*, vol.30, no.1, pp.64-67, 2009.
- [10] 後藤哲哉：“脳神経外科領域におけるロボット手術の現状”, *信州医誌*, vol.62, no.1, pp.68-69, 2014.
- [11] 梶田泰一, 森健策, 林雄一郎, 若林俊彦, 吉田純：“ナビゲーション脳神経外科手術の現状と展望”, *脳神経外科ジャーナル*, vol.22, no.7, pp.510-518, 2013.
- [12] 金子周司, 大竹博：“ライフサイエンス辞書からクリニカルインフォマティクスへ”, *情報管理*, vol.53, no.9, pp.473-479, 2010.
- [13] 片岡弘之, 正宗賢, 佐久間一郎, 土肥健純：“脳モデルの調整による術中脳変形の変形形状推定”, *コンピュータ外科学会誌*, vol.2, no.1, pp.30-38, 1999.
- [14] 小池麻子：“テキストマイニングにおける潜在的知識の発見支援”, *情報処理*, vol.48, no.8, pp.824-829, 2007.
- [15] 小林英司, 光嶋 勲, 大西 公平：“手術ロボットはヒトの微細な力触覚情報を再現できるか”,

- Medical Torch*, vol.11, no.1, pp.28-33, 2015.
- [16] 小林奈津子, 宮本潮, 大山国夫: “低侵襲手術支援システム「Navoit」の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.2, pp.22-25, 2005.
- [17] 菰田文男: “「単語セット」の作成と進化に基づくテキストマイニング手法”, 情報管理, vol.54, no.9, pp.568-578, 2011.
- [18] 倉田真由美, 瀧川薫: “日本の医学論文における生体肝移植の発展過程”, 滋賀医科大学看護学ジャーナル, vol.8, no.1, pp.26-29, 2010.
- [19] 串間宗夫, 荒木賢二, 鈴木斎王, 荒木早苗, 仁鎌照絵: “電子カルテ入院患者記録のテキストマイニング”, *The 26th Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence; 2012*, pp.2-1, 3K2-NFC-3-1, 2012.
- [20] 正宗賢, 中村亮一, 小林英津子, 佐久間一郎, 土肥健純, 伊関洋, 高倉公朋: “駆動分離型定位脳手術支援マニピュレータシステム”, コンピュータ外科学会誌, vol.1, no.1, pp.24-29, 1999.
- [21] 正宗賢, 大島研介, 長能弘明, 栗林聰, 中島勸, “低侵襲脊椎外科手術のためのナビゲータロボットシステムおよび操作インタフェースの研究”, 総合研究所年報, vol.23, pp.119-124, 2003.
- [22] 美馬秀樹: “近代文献のデジタルアーカイブ化とテキストマイニング”, 情報処理学会研究報告, 2012-CH-95-4, pp.1-8, 2012.
- [23] 森川康英: “外科医の求めるロボットハンド”, バイオメカニズム学会誌, vol.32, no.3, pp.130-133, 2008.
- [24] 村垣善治・伊関洋ら13名: “Open MRIを用いた「Real-Time」Navigationの開発”, コンピュータ外科学会誌, vol.2, no.3, pp.213-214, 2000.
- [25] 中辻隆徳・橋詰誠: “外科医の求めるロボットハンド”, バイオメカニズム学会誌, vol.32, no.3, pp.125-129, 2008.
- [26] 那須川哲哉, テキストマイニングを使う技術／作る技術, 東京電機大学出版会, pp.1-236, 2006.
- [27] 西山莉沙, 竹内広宣, 渡辺日出雄, 那須川哲哉: “新技術が持つ特長に注目した技術調査支援ツール”, 人工知能学会論文誌, vol.24, no.6, pp.541-548, 2009.
- [28] 大西公平: “低侵襲外科手術ロボットの力触覚フィードバック”, コンピュータ外科学会誌, vol.11, no.2, p.57, 2009.
- [29] 大澤幸生: チャンス発見のデータ分析, pp.1-273, 東京電機大学出版局, 2006.
- [30] 大澤幸生: チャンス発見の情報技術, pp.1-354, 東京電機大学出版局, 2003.
- [31] 大津良司: “医療ロボット開発を先導するイノベーション・インテグレーターを助けるテキストマイニング” (菰田, 那須川編, 技術戦略としてのテキストマイニング, 中央経済社, 2014所収), pp.163-192.
- [32] 小澤荘治: “手術支援ロボットの研究開発と将来展望”, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.3, pp.284-286, 2009.
- [33] 田中克幸, 渡辺哲陽, 米山猛: “小型医療機器の変性ストレス評価” (http://www.altairhyperworks.jp/html/ja-JP/PDF/AOP/I509_kanazawa.pdf), 2016.02.07参照.
- [34] 齊藤研究室 (東京大学医学部脳神経外科) のHP: “脳神経外科手術用微細ロボティックスシステムの開発”, (http://plaza.umin.ac.jp/~ikourenk/department/project_06/index.html), 2016.01.20参照.